

Eigenschaften von extrasolaren Planeten

Heiße Jupiter, zweite Erden und die Neptunwüste

PHILIPP EIGMÜLLER

Bislang wurden mehr als 4000 extrasolare Planeten entdeckt. Obwohl die bisherigen Entdeckungsmethoden keine statistisch vollständigen Mengen erfassen, lassen sich verschiedene Populationen identifizieren. Sie erweitern unser Verständnis von der Entstehung und Entwicklung von Planeten, werfen aber auch viele Fragen auf.

Im Oktober letzten Jahres wurden Michel Mayor und Didier Queloz für die Entdeckung des ersten extrasolaren Planeten im Jahr 1995 mit dem Physik-Nobelpreis geehrt (Physik in unserer Zeit **2019**, 50(6), 272). Sie haben damit, so das Nobel-Komitee, wesentlich zum Verständnis der Stellung der Erde im Kosmos beigetragen. Die Entdeckung des „heißen Jupiters“ 51 Pegasi b (offiziell 2015 Dimidium benannt) gab nicht nur der Erforschung von Exoplaneten einen enormen Schub (Abbildung 1), sondern führte auch gleich zu heftigen Diskussionen.

Der Gasplanet mit einer Umlaufzeit von nur 4,2 Tagen kreist dichter an seinem Stern als man es je für möglich gehalten hatte. Schon diese erste Entdeckung zeigte, dass Planeten anderer Sterne ganz anders sein können als wir es von unserem Sonnensystem her kennen.

Wir kennen über 4000 Exoplaneten

Abbildung 2 zeigt die zeitliche Entwicklung der Planetenentdeckungen [1]. Die Farben beziehen sich auf unterschiedliche Entdeckungsmethoden. Mittlerweile wurden über 4000 Planeten entdeckt (siehe auch „Transit- und Radialgeschwindigkeitsmethode“, S. 128). Von den allermeisten kennen wir nur den Radius oder die untere Grenze für die Masse. Einige sind mit mehreren Methoden bestätigt und wurden extensiv nachbeobachtet, andere sind lediglich validierte Kandidaten, für welche die Nachbeobachtungen aufgrund ihrer Entfernung zu schwierig sind. Unter den Planeten, die nur mit der Transitmethode beobachtet und nicht mit einem anderen Verfahren bestätigt wurden, gibt

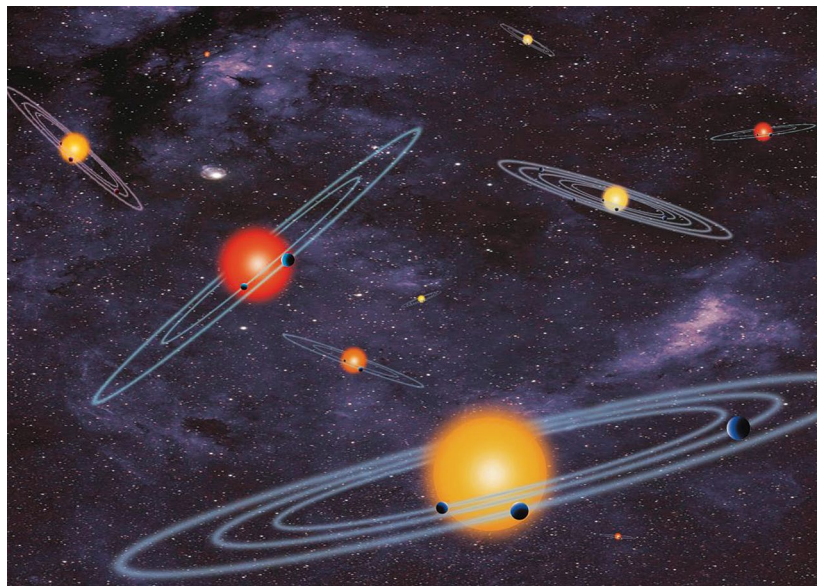


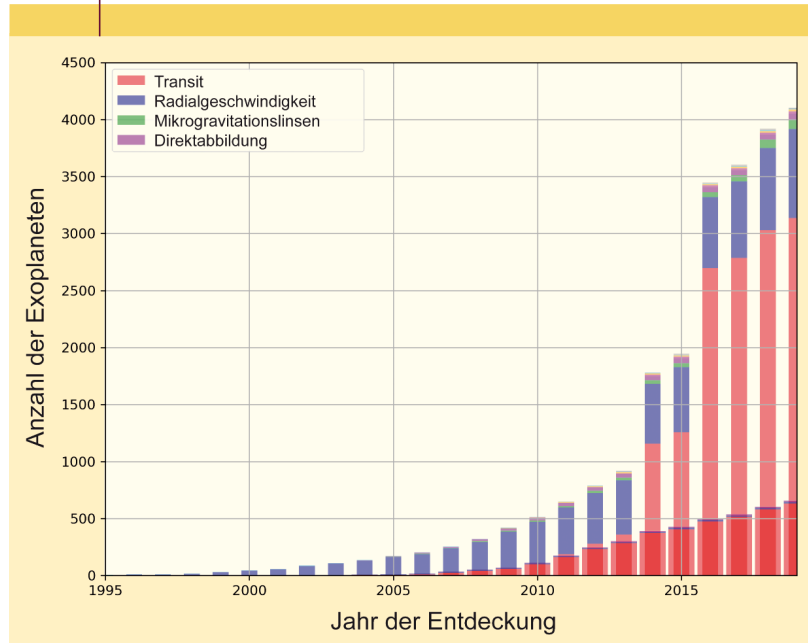
Abb. 1 Bei mehr als 4000 Sternen wurden Exoplaneten gefunden, fast 700 werden von mehreren Planeten umkreist. Bei dem Stern Trappist-1 wurden sogar sieben Planeten nachgewiesen.

es eine große Anzahl von möglichen falsch-positiven Messungen. Zum Beispiel können bedeckungsveränderliche Doppelsterne im Hintergrund des Objektes ähnliche Helligkeitsvariationen verursachen wie Planeten im Transit. Für leuchtschwache Objekte, bei denen eine unabhängige Bestätigung mit der Radialgeschwindigkeitsmessung nicht möglich ist, wurden verschiedene Methoden entwickelt, um eine Fehleinschätzung möglichst auszuschließen. Diese nennt man dann validierte Kandidaten.

Um die Populationen von Planeten zu analysieren, kann man sich die bekannten Exoplaneten nun in Bezug auf verschiedene Parameter, wie Radius, Masse oder große Halbachse der Bahn, anschauen. Hierbei müssen wir beachten, dass unsere Entdeckungen nicht unbedingt die direkte statistische Abbildung ihrer Gesamtheit widerspiegeln, sondern nur einen kleinen Ausschnitt zeigen, der uns mit unseren technischen Möglichkeiten zugänglich ist. Dieser Auswahl-effekt (Beobachtungsbias) ist für die verschiedenen Methoden unterschiedlich und hängt auch von den Instrumenten

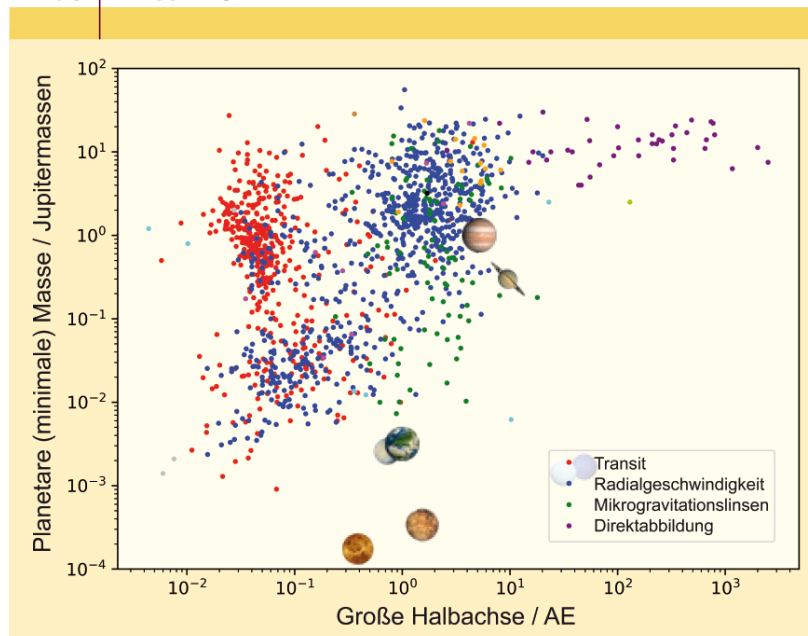
This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABB. 2 | ENTDECKTE EXOPLANETEN



Kumulative Anzahl der mit verschiedenen Beobachtungsmethoden entdeckten Planeten. Die schmalen Balken zeigen alle bekannten Exoplaneten, die breiten Balken zeigen nur jene Exoplaneten, von denen Masse und Radius mit einer Unsicherheit von weniger als 50% bekannt sind (Stand: Dezember 2019). Weitere farblich gekennzeichnete Entdeckungsmethoden sind nicht explizit benannt.

ABB. 3 | MASSEN UND BAHNRADIEN



Massen bekannter Exoplaneten in Abhängigkeit von der großen Halbachse ihrer Bahn. Farblich kodiert sind die verschiedenen Beobachtungsmethoden. Zur Orientierung sind die Planeten des Sonnensystems dargestellt. Je nach Beobachtungsmethode sind unterschiedliche Verteilungen der Planeten erkennbar. Dies ist auf die verschiedenen Empfindlichkeiten der Methoden zurückzuführen. Während zum Beispiel Transitsurveys hauptsächlich Planeten auf engen Umlaufbahnen finden (rot), können Planeten auf weiten Bahnen nur durch direkte Beobachtung nachgewiesen werden (violett). Die derzeitige Empfindlichkeit reicht nicht aus, um ein Planetensystem wie unseres zu beobachten.

und Beobachtungsstrategien ab. Daher ist Vorsicht geboten. Es ist eine sehr sorgsame statistische Analyse notwendig, die sämtliche Beobachtungseinschränkungen herausrechnet, wenn man alle Planeten zusammen betrachtet und statistisch signifikante Populationsanalysen machen will. Etwas einfacher wird es, wenn man sich auf Entdeckungen mit einem speziellen Instrument fokussiert, insbesondere wenn der Beobachtungsbias gut charakterisiert ist.

Trägt man die planetaren Massen in Abhängigkeit von den Umlaufperioden, entsprechend den großen Halbachsen, auf (Abbildung 3), so erkennt man, dass sich die Populationen je nach Beobachtungsmethode unterscheiden. Ähnliche Effekte kann man auch beim Vergleich unterschiedlicher Instrumente sehen. So finden sich die vielen heißen Jupiter, die mit bodengebundenen Transitsurveys gefunden wurden, links oben in Abbildung 3 (rote Punkte). Diese Surveys beschränken sich auf große kurzperiodische Planeten, erlauben aber dafür die Beobachtung vieler Objekte. In Blau sind die Entdeckungen mit der Radialgeschwindigkeitsmethode dargestellt. Zwar lassen sich mit ihr leichter kurzperiodische, große Planeten finden, aber es können auch kleinere Planeten auf weiten Bahnen aufgespürt werden. Da generell anscheinend weniger heiße Jupiter existieren als kleinere Planeten oder auch Planeten auf weiten Orbits, sind hier bei weitem nicht so viele heiße Jupiter gefunden worden. Direkte Abbildungen von Planeten (violett) sind bisher nur für große Planeten auf weiten Bahnen möglich, weil in diesen Fällen der Helligkeitskontrast zwischen Stern und Planet nicht so groß ist. Hierfür findet man eine gänzlich andere Verteilung.

Was wir von Exoplaneten wissen

Die unterschiedlichen Entdeckungsmethoden besitzen nicht nur unterschiedliche Beobachtungsbias, sondern erlauben es auch, unterschiedliche planetare Parameter zu bestimmen. So lässt sich sowohl mit der Radialgeschwindigkeits- als auch mit der Transitmethode die Umlaufdauer messen. Zusätzlich ermöglicht uns die Radialgeschwindigkeit, die planetare Masse – in Abhängigkeit von der Sternmasse und der Neigung der Bahnebene – sowie die Bahnexzentrizität zu bestimmen. Die Transitmethode gibt uns dagegen den Radius des Planeten in Abhängigkeit vom Sternradius. Zusätzlich kann man mit der Transitmethode auch die Bahnneigung bestimmen. Optimal ist die Kombination beider Methoden. In diesem Fall bekommen wir neben den Bahnparametern auch Masse und Radius des Planeten und somit seine mittlere Dichte. Insgesamt kennen wir derzeit von etwas mehr als 600 Planeten Radius und Masse und können so etwas über die mittleren Dichten der Planeten aussagen.

Wenn wir momentan von Populationsanalysen bei Exoplaneten sprechen, betrachten wir zumeist entweder die Masse oder den Radius, da nur diese Parameter mit hoher Genauigkeit für eine große Anzahl von Planeten bestimmt sind. Die Verteilungen werden dann jeweils in Bezug auf Bahnparameter der Planeten und stellare Parameter unter-

sucht. Die entscheidenden Größen, die den Stern charakterisieren, sind die effektive Temperatur, Masse und Radius sowie die chemische Zusammensetzung (Metallizität). Das Alter der Planetensysteme ist ein weiterer sehr interessanter Parameter, gerade um die Entwicklung von Planetensystemen zu betrachten. Es ist allerdings bisher nur für sehr wenige Systeme bekannt.

Dank des sehr großen homogenen Datensatzes an Planeten vom Weltraumteleskop Kepler ist eine Populationsanalyse in Bezug auf die Planetengröße besonders gut möglich. In Abbildung 4 sind alle Kepler-Entdeckungen mit den Planetenradien über Umlaufzeiten aufgetragen (schwarze Punkte). Für die langperiodischen und die kleinen Planeten erreichen wir die Nachweisgrenze von Kepler (roter Bereich). Für den übrigen Bereich können wir von geringen Auswahlwirkungen ausgehen. Man muss natürlich im Blick haben, dass die längeren Perioden immer geringere Transitwahrscheinlichkeit haben und daher dies in statistischen Analysen korrigiert werden muss. Diese durch geometrische Bedingungen gegebene Wahrscheinlichkeit ist aber klar definiert und kann gut herausgerechnet werden.

Unabhängig fällt in Abbildung 4 die große Dichte an kleineren Gesteinsplaneten auf. Offensichtlich kommen kleine Planeten häufiger vor als große. Zwischen den großen und den kleinen Planeten klafft insbesondere für die kurzperiodischen Planeten eine Lücke, die wir auch als Neptunwüste bezeichnen. Bei den Gasplaneten unterscheiden wir die heißen Jupiter, während wir bei den Gesteinsplaneten solche mit ultrakurzen Perioden von unter einem Tag extra bezeichnen.

Heiße Jupiter

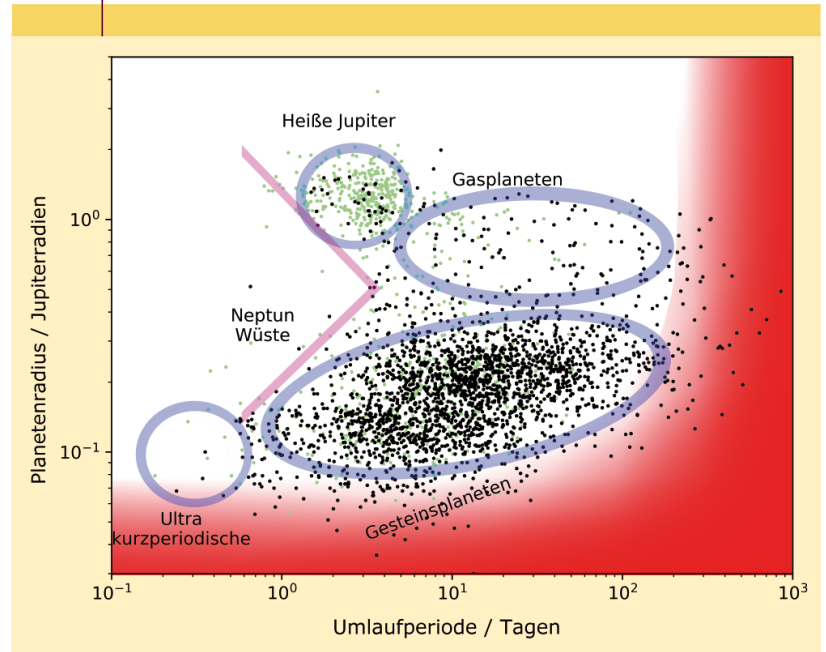
Unter heißen Jupitern verstehen wir Gasriesen, die relativ dicht um ihren Stern kreisen. Durch die starke Einstrahlung haben sie eine hohe mittlere Temperatur, typischerweise über 1000 K. Die hohe Temperatur bewirkt eine Ausdehnung der Atmosphäre, was dazu führt, dass heiße Jupiter etwas größer sind als wir das von kühleren Gasplaneten kennen. Radien von bis zu dem zweifachen Jupiterradius wurden schon beobachtet.

Heiße Jupiter sind mit der Transitmethode wegen ihrer Größe und der kurzen Umlaufdauer besonders einfach zu finden, weshalb insbesondere bodengebundene Beobachtungskampagnen hier eine Vielzahl von Beispielen entdeckt haben. Auch für die Nachbeobachtung sind sie von besonderem Interesse. Die Größe lässt stärkere Beobachtungssignale erwarten, und die kurze Umlaufdauer erlaubt viele Transitbeobachtungen. Von etlichen heißen Jupitern konnten bereits die Atmosphären untersucht werden.

Ultrakurzperiodische Planeten

Heiße Jupiter haben Umlaufzeiten bis zu drei Tagen. Wesentlich kürzere Zeiten und damit engere Bahnen haben die ultrakurzperiodischen Gesteinsplaneten. Mit Perioden unter einem Tag sind sie extrem dicht am Stern. Die starken Gezeitenkräfte führen dann zu einer Synchronisierung der

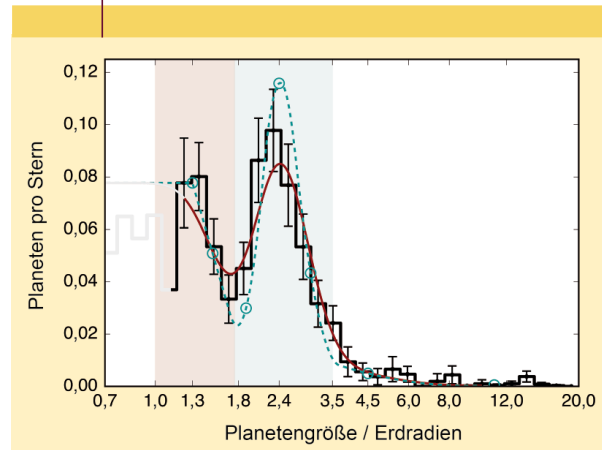
ABB. 4 | RADIUS-PERIODEN-DIAGRAMM



Beobachtungsdaten mit Kepler (schwarz) und anderen, hauptsächlich bodengebundenen Transitsurveys (grün). Die rote Fläche zeigt schematisch den Beobachtungsbias von Kepler: Kleine Planeten mit langen Umlaufzeiten können nur schwer oder auch gar nicht mit Kepler beobachtet werden. In diesen Bereichen ist eine statistische Analyse schwierig. Für den weißen Bereich ist Kepler relativ vollständig, wobei bei längeren Perioden generell die Wahrscheinlichkeit eines Transits sinkt.

Umlaufdauer mit der Eigenrotation des Planeten: Diese Planeten wenden ihrem Stern immer die gleiche Seite zu (gebundene Rotation). Wir kennen das vom Erde-Mond-System, wo wir auch immer die gleiche Seite des Mondes von der Erde aus sehen. Durch die starke Einstrahlung des Sterns sind diese Planeten auf der dem Stern zugewandten Seite sehr heiß. Typischerweise erreicht die Temperatur der Tagseite die Schmelztemperatur von Gestein und höher.

ABB. 5 | GRÖßENVERTEILUNG KLEINER PLANETEN



Lücke in der Größenverteilung bei den kleinen Planeten (nach [2]).

Daher werden sie auch Lavawelten genannt. Die ersten charakterisierten Gesteinsplaneten CoRoT-7b und Kepler 10b gehören zu dieser Klasse.

Gesteinsplaneten

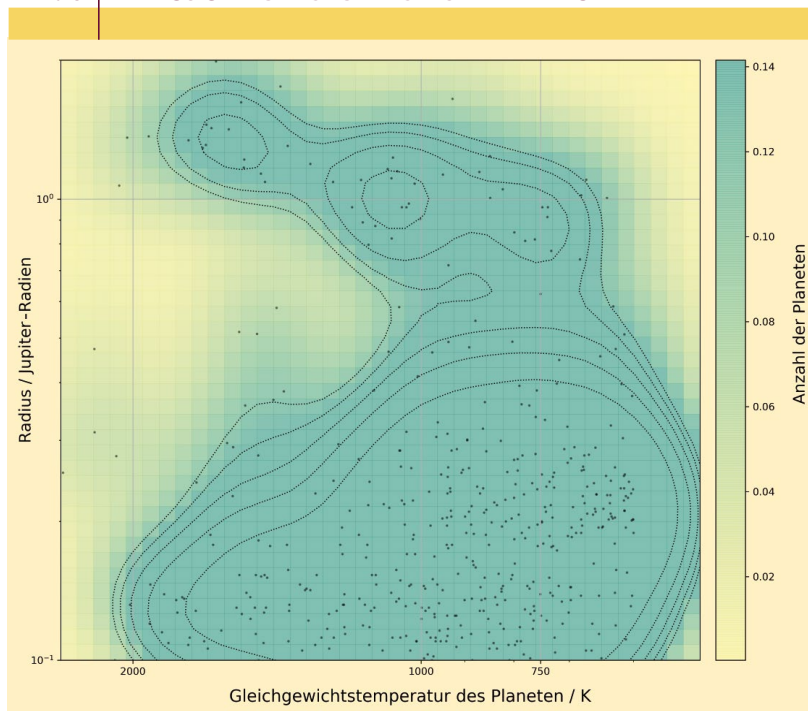
Die meisten bekannten Planeten sind Gesteinsplaneten mit Umlaufzeiten von mehr als einem Tag. Eine sehr detaillierte Studie in Abhängigkeit von ihrer Größe hat 2017 ein Team um Benjamin Fulton von der University of Hawaii veröffentlicht [2]. In dieser Studie wurde ein homogener Satz von Kepler-Planeten zur Grundlage genommen, und Beobachtungseffekte in der Analyse wurden entsprechend berücksichtigt. Demnach gibt es zwei Populationen von Gesteinsplaneten (Abbildung 5), zwischen denen Körper um 1,7 Erdradien unterrepräsentiert sind. Es gibt Ansätze, diese zwei Populationen mit Modellen zu erklären. Allerdings wird momentan auch diskutiert, ob diese Trennung wirklich so groß ist. Der Radius der mit Kepler entdeckten Planeten lässt sich nur schwer bestimmen. Da die Planeten nur indirekt beobachtet werden, hängt der berechnete Planetenradius von dem Radius des jeweiligen Sterns und der beobachteten Verdunkelung ab. Befinden sich aber noch weitere Sterne sehr nahe am beobachteten Stern, so hat dies Einfluss auf die relative Verdunkelung beim planetaren Transit. Dies kann zu einer Fehlbestimmung des planetaren Radius führen [8]. Weitere Entdeckungen und genauere Beobachtungen werden hier endgültige Gewissheit bringen und dazu beitragen, Abhängigkeiten von stellaren Parametern besser zu verstehen.

Die Neptunwüste

Ein weiteres diskutiertes Phänomen ist die Neptunwüste. Sie beschreibt einen Parameterbereich, in dem wir keine oder kaum Planeten entdeckt haben. Diese Region liegt in Masse und Größe zwischen heißen Jupitern und ultrakurzperiodischen Gesteinsplaneten. Schauen wir nur die mit Kepler gefundenen Transitplaneten an, so sehen wir sowohl kleine, sehr heiße Gesteinsplaneten als auch große, aufgeblähte heiße Jupiter. Es fehlen jedoch heiße Planeten etwa von der Größe Neptuns (Abbildung 6). Diese Beobachtung ist statistisch signifikant und nicht einem Auswahl-effekt geschuldet. Planeten dieser Größe können offenbar nicht lange so dicht an ihrem Stern existieren. Es gibt verschiedene Modelle, mit denen dies erklärt werden könnte. Welcher Effekt aber tatsächlich dafür verantwortlich ist, ist noch in Diskussion [3–5].

Wir wissen, dass Planeten nicht dicht am Stern entstehen können, weil die Strahlung das Zusammenballen der Gas- und Staubeilchen zu großen Körpern verhindert. Für heiße Jupiter und auch die heißen Gesteinsplaneten gehen wir davon aus, dass diese weiter außen im Sternensystem entstanden und schließlich durch gravitative Wechselwirkung dichter an ihren Stern herangewandert sind. Wenn wir keine neptungroßen Planeten so dicht am Stern finden, kann dies zum einen bedeuten, dass Planeten dieser Größe nicht so dicht an ihren Stern heranwandern können. Eine andere Möglichkeit ist, dass solche Planeten, die ihrem Stern zu nahe kommen, Teile ihrer Masse verlieren oder gänzlich vergehen.

ABB. 6 | RADIUS UND GLEICHGEWICHTSTEMPERATUR



Bekannte Planeten mit ihrem Radius über der Gleichgewichtstemperatur aufgetragen. Generell gilt: je heißer, desto näher am Stern ist der Planet, wobei auch die Temperatur des Sternes eine Rolle spielt.

Was wir im kommenden Jahrzehnt erwarten

Zurzeit gibt es insbesondere zwei Weltraummissionen für das wissenschaftliche Feld der Exoplaneten. Eine ist das 2013 gestartete, europäische Weltraumteleskop GAIA, dessen Bedeutung man für die gesamte Astronomie gar nicht überschätzen kann. GAIA ist eine astrometrische Mission, welche die exakten Positionen und Entfernungen von Sternen vermisst. Da unser Verständnis der Planeten maßgeblich von einer genauen Charakterisierung der Zentralsterne abhängt, hat diese Mission einen erheblichen Einfluss auf die Planetenforschung. GAIA könnte aber auch direkt Planeten entdecken, zum Beispiel, wenn die Sterne sich über die gravitative Wirkung der Planeten am Himmel periodisch hin und her bewegen. GAIA ermöglicht neue Einblicke in die Population von großen, extrem langperiodischen Planeten.

Zum anderen sucht das 2018 gestartete Weltraumteleskop TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) der NASA mit der Transitmethode erfolgreich nach kurzperiodischen Planeten um helle, nahe Sterne. Insbesondere durch die Nähe der Planeten sind einige der zu erwartenden Entdeckungen besonders interessant für nachfolgende Charakterisierungen.

Nach wie vor gibt es auch bodengebundene Beobachtungskampagnen, die mit Radialgeschwindigkeitsmessungen sowie der Transitmethode nach Exoplaneten suchen.

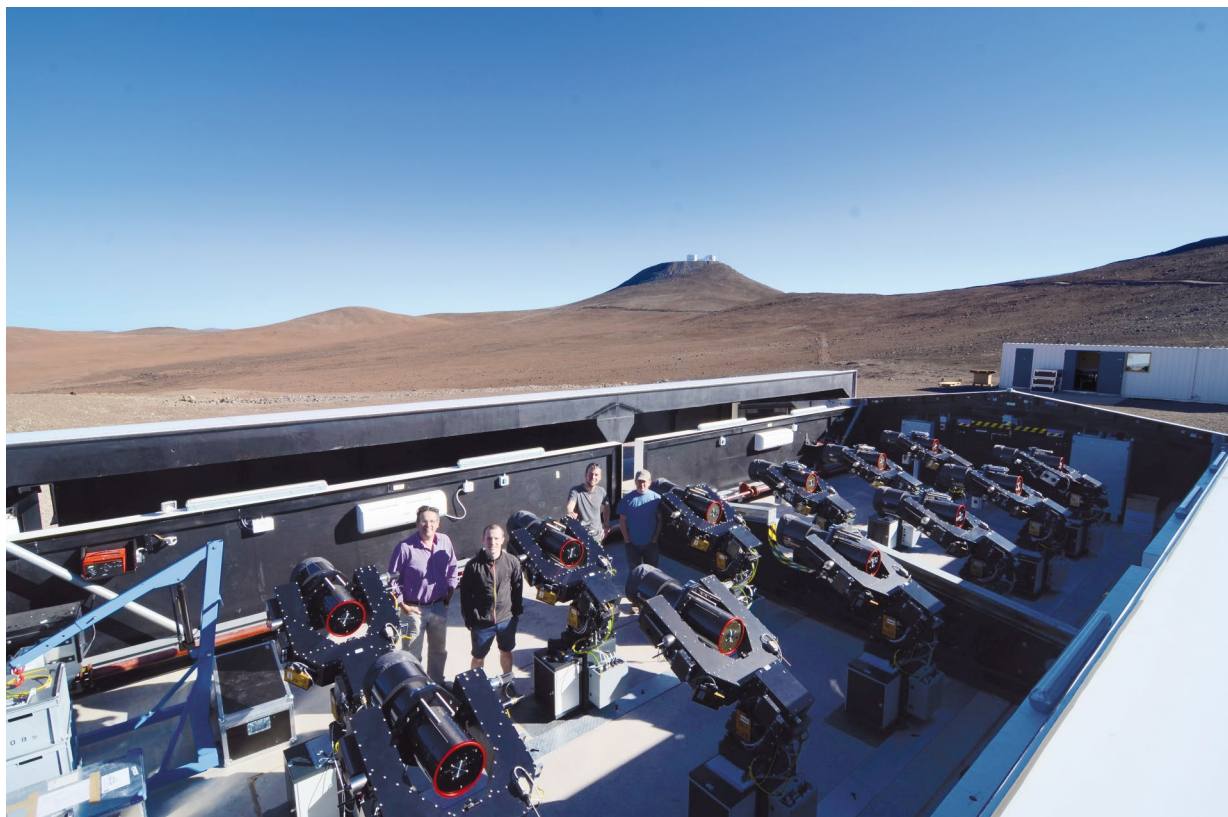


Abb. 7 Das NGTS-Observatorium auf dem Cerro Paranal in den chilenischen Anden (Foto: ESO).

Eine davon ist der seit 2015 laufende Next-Generation Transit Survey (NGTS), eine photometrische Teleskopanlage zur Suche nach transitierenden Exoplaneten (Abbildung 7). Der Fokus liegt auf neptungroßen Planeten bei roten Zwergsternen (K-Sterne). Das NGTS-Instrument besteht aus zwölf eigenständigen Kleinteleskopen, die voll robotisch betrieben werden. NGTS beobachtet in einem Wellenlängenbereich von 520 nm bis 890 nm, was insbesondere für K-Sterne optimiert ist [6].

Im Gegensatz zu früheren, bodengebundenen photometrischen Surveys erreicht NGTS eine deutlich höhere Genauigkeit. Durch eine exakte Ausrichtung der Teleskope und optimale Nachführung ist es möglich, die Sterne über mehrere Monate hinweg immer auf demselben Pixel der Kamera zu halten. Dies reduziert Rauschen, das beispielsweise durch unterschiedliche Empfindlichkeiten von CCD-Pixeln herrührt.

Weitere Satellitenmissionen und bodengebundene Instrumente sind geplant oder bereits im Bau. Zum einen gibt es Teleskope, die es ermöglichen werden, einzelne Planeten wesentlich detaillierter zu untersuchen. Dazu zählen die ESA-Missionen Cheops (CHaracterising ExOPlanet Satellite, Start 2019) (Abbildung 8) und Ariel (Atmospheric Remote-sensing Infrared Exoplanet Large-survey, Start 2028) sowie das NASA-Weltraumteleskop James Webb (Start 2021). Auch die zukünftige Generation von bodengebundenen Großwteleskopen mit Spiegeldurchmessern von 30 m und

mehr wird viele neue Erkenntnisse liefern. Die Bauarbeiten für das Extremely Large Telescope der ESO in der Atacama-Wüste in Chile haben bereits begonnen (Physik in unserer Zeit **2011**, 42(2), 64).

Einzelne Planeten bei besonders nahen Sternen oder anderweitig sehr günstig zu beobachtende Sterne kann man schon jetzt wesentlich genauer charakterisieren, zum Beispiel mit der Transmissionsspektroskopie. Bei einem Transit blockiert der Planet nicht nur das Licht seines Zentralsterns, sondern ein Teil scheint durch die Atmosphäre des Planeten hindurch. Dies bietet die Chance, mit spektroskopischen oder photometrischen Beobachtungen Bestandteile der Atmosphäre zu erkennen. Bei Gasriesen wurden zum Beispiel schon Wasser, Methan und Titanoxid nachgewiesen, auch atomares Eisen und Titan ließen sich nachweisen. Heutige Instrumente erlauben solche Beobachtungen noch nicht für Gesteinsplaneten. Das ist das Ziel zukünftiger Teleskope.

Überdies wurde für einzelne Planeten nicht nur die Bedeckung des Sterns, sondern auch die Bedeckung des Planeten von dem Stern beobachtet. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Menge des reflektierten Lichts vom Planeten, was uns die Albedo (Rückstreuung) des Planeten gibt.

Mit all diesen Informationen wird es uns zukünftig möglich sein, die Atmosphären von Exoplaneten zu modellieren und Aussagen über ihre Bewohnbarkeit zu machen. Wir können also sagen, ob die Temperaturen und die Atmosphäre

eines Planeten geeignet sind für Leben, wie wir es kennen. Vielleicht wird es sogar möglich sein, mit Hilfe der atmosphärischen Signaturen auf biologische Prozesse, welche die Atmosphäre des Planeten beeinflusst haben, zu schließen (Physik in unserer Zeit **2019**, 50(4), 184).

Die ESA-Mission PLATO (PLANetary Transits and Oscillations of stars, Start 2026) wird in Bezug auf die Charakterisierung von Planetenpopulationen und die Neuentdeckungen von Planeten der nächste große Meilenstein sein [7]. PLATO wird mit der Transitmethode nach Exoplaneten suchen, wobei der Schwerpunkt auf kleinen Planeten auf erdähnlichen Bahnen um sonnenähnliche Sterne liegt. Zusätzlich wird PLATO uns erlauben, für viele Planetensysteme das Alter zu bestimmen und so Populationen auch nach ihrem Entwicklungsstand einzuordnen. Damit bekommen wir erstmals in großem Umfang ein Verständnis für die Entwicklung von Planetensystemen.

Bis dahin werden momentane Weltraummissionen, wie TESS und GAIA, aber auch eine Vielzahl von bodengebundenen Beobachtungsprojekten wie NGTS weitere Entdeckungen liefern.

Zusammenfassung

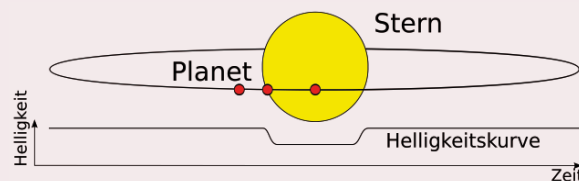
Im vergangenen Vierteljahrhundert hat die Erforschung extrasolarer Planetensysteme große Fortschritte gemacht. Von der ersten Entdeckung sind wir nun zu über 4000 bekannten Exoplaneten gekommen. Die meisten der gefundenen Systeme sehen anders aus als unser Sonnensystem, allerdings wäre ein Planetensystem wie das Sonnensystem auch noch an der Grenze des Beobachtbaren. Hier müssen wir in unseren Möglichkeiten noch einen Schritt weitergehen, bevor wir das „zweite Sonnensystem“ entdecken. Zukünftige Satellitenmissionen wie PLATO werden uns hier helfen.

TRANSIT- UND RADIALGESCHWINDIGKEITSMETHODE

Transitmethode

Liegt die Bahnebene eines Exoplaneten in unserer Blickrichtung, so zieht der Planet bei jeder Umrundung einmal zwischen uns und seinem Stern vorbei und blockiert einen Teil des Sternlichts. Dessen Menge hängt von der Größe des Sterns und der Größe des Planeten ab. Jupiter würde etwa 1 % des Sonnenlichts blockieren, die Erde nur 0,01 %.

Die Abbildung zeigt eine schematische Darstellung eines Transits. Dessen Länge und die Neigung der Flanken der Lichtkurve sind abhängig von der Bahnneigung, während die Transittiefe hauptsächlich von dem Größenverhältnis Planet zu Stern abhängt.



Prinzip der Transitmethode.

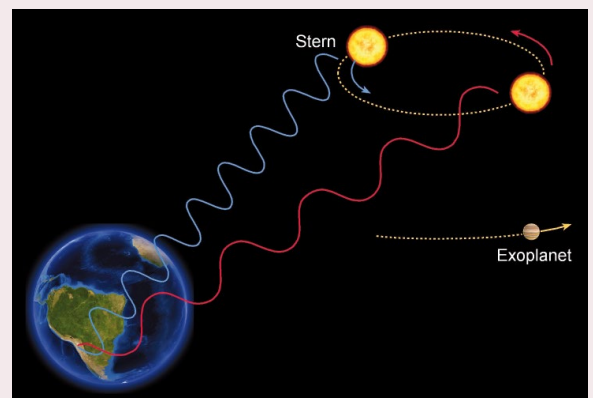
Eine wesentliche Herausforderung der Transitmethode ist die geringe Wahrscheinlichkeit, dass ein planetarer Orbit direkt in unserer Blickrichtung liegt. Für enge Planetenbahnen kann auch bei leichter Kippung der Bahnebene zur Sichtebeine noch ein Transit beobachtet werden, bei großen Bahnradien muss der Orbit dagegen sehr genau in unserer Blickrichtung liegen. Weite Orbits sind zusätzlich schwerer zu beobachten, da lange Beobachtungskampagnen notwendig sind, um einen Transit, der nur einmal pro Umlauf vorkommt, zu beobachten. Bodengebundene Beobachtungskampagnen können daher kaum langperiodische Planeten finden. Der Tag-Nacht-Zyklus verhindert eine durchgängige Beobachtung, sodass die Wahrscheinlichkeit für die Beobachtung von langperiodischen Planeten gering ist.

Mit genauer Modellierung eines Transits und Bestimmung der stellaren Parameter kann man mit der Transitmethode den Radius des Planeten, die Bahnparameter sowie die Neigung der Bahn zu unserer Sichtlinie bestimmen. Auch

die Helligkeitsverteilung auf der Sternoberfläche lässt sich teilweise recht gut modellieren.

Radialgeschwindigkeitsmethode

Bei der Radialgeschwindigkeitsmethode messen wir die relative Bewegung des Sterns in unserer Blickrichtung. Da Stern und Planet mit gleicher Periode um einen gemeinsamen Schwerpunkt kreisen, bewegt sich der Stern geringfügig. Je nachdem, ob er sich auf uns zu oder von uns fort bewegt, ist sein Licht blau- oder rotverschoben. Mithilfe von hochauflösender Spektroskopie kann man diese Verschiebung der Spektrallinien genau vermessen und so auf die Bewegung des Sterns in unserer Blickrichtung schließen. Diese Bewegung hängt maßgeblich von dem Massenverhältnis von Stern und Planet ab. Da wir allerdings lediglich die Komponenten der Bewegung in Blickrichtung bestimmen können, kann die eigentliche Bahngeschwindigkeit auch höher sein. Daher erlaubt uns dies nur auf das Massenverhältnis in Abhängigkeit von der Neigung der Bahnebene zur Blickrichtung zu schließen. Erst in Kombination mit der Transitmethode, mit der wir die Bahnneigung bestimmen können, lässt sich die Masse berechnen.



Prinzip der Radialgeschwindigkeitsmethode (Grafik: ESO).

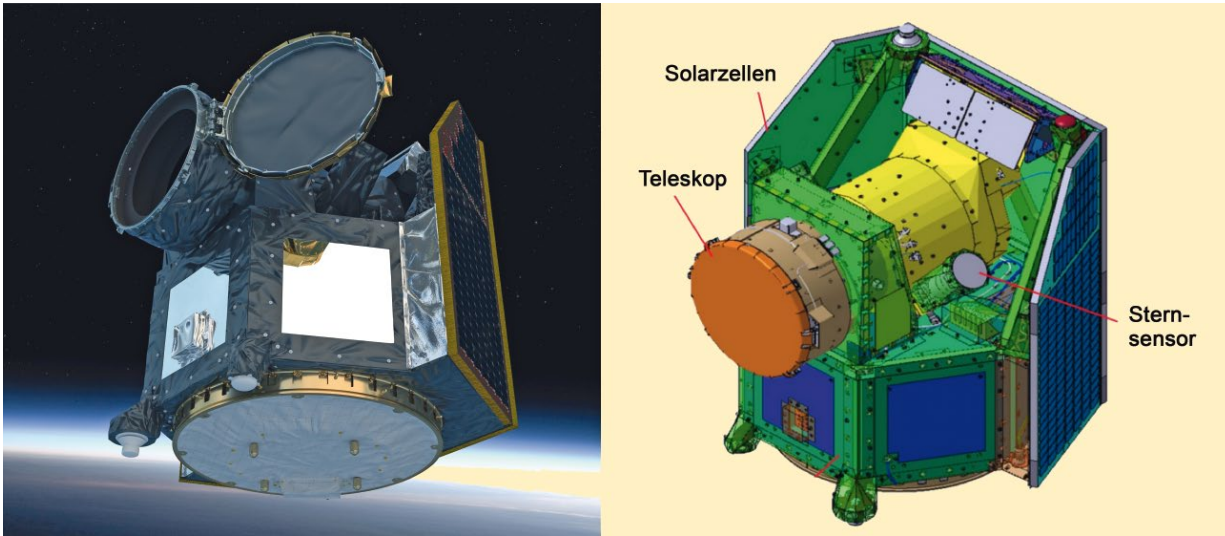


Abb. 8 Das im Dezember 2019 gestartete Weltraumteleskop CHEOPS (Grafik: ESA, ATG medialab).

Stichwörter

Extrasolare Planeten, Exoplaneten, Transitmethode, Radialgeschwindigkeitsmethode, Heiße Jupiter, Neptunwüste, Lavawelten, erdähnliche Planeten, Gesteinsplaneten.

Literatur

- [1] NASA Exoplanet Archive, <https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>
- [2] B. J. Fulton et al., *Astron. J.* **2017**, 154, 1.
- [3] J. E. Owen, D. Lai, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **2018**, 479, 5012.
- [4] T. Matsakos, A. Königl, *Astron. J.* **2016**, 820, 1.
- [5] Ph. Eigmüller et al., *Astron. Astrophys.* **2019**, 625, A 142.
- [6] P. J. Wheatley et al., *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **2018**, 475, 4.
- [7] H. Rauer et al., *Experimental Astron.* **2014**, 38, 1.
- [8] J. Teske et al., *Astron. J.* **2018**, 156, 292.

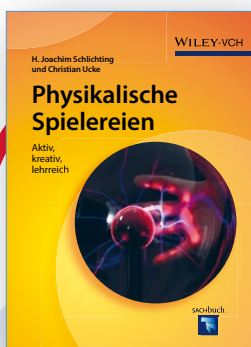
Der Autor



Philipp Eigmüller hat an der Universität Leipzig Physik studiert. An der Thüringer Landessternwarte Tautenburg begann er sich während seiner Doktorarbeit mit Exoplaneten zu beschäftigen. Seit 2010 arbeitet er am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), im Institut für Planetenforschung.

Anschrift

Dr. Philipp Eigmüller, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Planetenforschung, Rutherfordstraße 2, 12489 Berlin.
Philipp.Eigmue@dlr.de



H. J. SCHLICHTING, und C. UCKE

Physikalische Spielereien

Aktiv, kreativ, lehrreich

2016. 150 Seiten, ca. 250 Abbildungen, davon 250 in Farbe. Gebunden.
€ 29,90. ISBN: 978-3-527-33893-1

„Der Mensch ist nur da ganz Mensch, wo er spielt“

Dass dieses Motto von Friedrich Schiller auch und gerade im Zusammenhang mit der Physik gilt, zeigen Christian Ucke und H. Joachim Schlichting eindrucksvoll im Buch „Physikalische Spielereien“.

Wiley-VCH • Postfach 10 11 61, 69451 Weinheim, Germany
Tel. +49 (0) 62 01-60 64 00 • Fax +49 (0) 62 01-60 61 84
E-mail: service@wiley-vch.de

Visit www.wiley-vch.de

WILEY-VCH